



# TREBALL FINAL DE GRAU



ESCOLA  
POLITÈCNICA SUPERIOR  
UNIVERSITAT DE LLEIDA  
INSPIRING THE FUTURE

Estudiant: Oscar Pueyo Torres

Titulació: Grau en Enginyeria Electrònica Industrial i Automàtica

Títol de Treball Final de Grau: **Control d'un motor pas a pas per tal de minimitzar el consum energètic**

Director/a: **Tomàs Palleja Cabré**

Presentació

Mes: Setembre

Any: 2018

## ÍNDIX

1.	Introducció .....	1
2.	Objectius .....	2
3.	Material .....	3
3.1.	Motor pas a pas .....	3
3.1.1.	Definició .....	3
3.1.2.	Tipus .....	4
3.1.3.	Principi de funcionament .....	6
3.1.4.	Problemàtica .....	14
3.1.5.	Model escollit .....	15
3.2.	Arduino Due .....	16
3.3.	Driver de motor .....	18
3.4.	Encoder .....	19
3.5.	Font d'alimentació .....	19
3.6.	Estructura física .....	20
3.7.	Connexionat .....	21
4.	Algoritmes de control .....	22
4.1.	Proporcional-integral .....	23
4.2.	Exponencial .....	24
4.3.	Voltatge .....	24
5.	Interfície .....	25
5.1.	Entrada escaló .....	26
5.2.	Entrada rampa .....	26
5.3.	Entrada sinusoïdal .....	27
5.4.	Funcionament .....	28
6.	Resultats .....	29
6.1.	Controlador proporcional-integral .....	29
6.2.	Controlador exponencial .....	31
6.3.	Controlador voltatge .....	33
7.	Conclusions .....	36
7.1.	Objectius .....	36
7.2.	Controlador proporcional-integral i exponencial .....	37
7.3.	Controlador voltatge .....	37
8.	Referències .....	38

## ÍNDIX TAULES

Taula 1. Seqüència polaritats bobines mode pas complet .....	8
Taula 2. Seqüència polaritats bobines mode mig pas.....	10
Taula 3. Especificacions tècniques motor pas a pas híbrid bipolar Motech MT-1704HS168A ...	15
Taula 4. Especificacions tècniques microcontrolador Arduino Due.....	16
Taula 5. Especificacions tècniques Pololu Dual MC33926 Motor Driver Shield .....	18
Taula 6. Imatge i especificacions tècniques encoder Yumo E6A2-CS3E .....	19
Taula 7. Imatge i especificacions tècniques font alimentació S-360-12 .....	19

## ÍNDEX FIGURES

Figura 1. Estructura interna motor pas a pas.....	4
Figura 2. Esquema bobines motor pas a pas unipolar .....	5
Figura 3. Esquema bobines motor pas a pas bipolar .....	5
Figura 4. Ponts en H per cada bobina del motor .....	7
Figura 5. Exemple funcionament pont en H bobina A .....	7
Figura 6. Seqüència polaritats bobines mode pas complet .....	8
Figura 7. Seqüència polaritats bobines mode pas complet mitjançant Matlab .....	9
Figura 8. Seqüència polaritats bobines mode mig pas.....	10
Figura 9. Seqüència polaritats bobines mode mig pas mitjançant Matlab.....	11
Figura 10. Seqüència polaritats bobines mode 16 micropassos mitjançant Matlab .....	12
Figura 11. Seqüència polaritats bobines mode 32 micropassos mitjançant Matlab .....	13
Figura 12. Motor pas a pas híbrid bipolar Motech MT-1704HS168A .....	15
Figura 13. Microcontrolador Arduino Due .....	16
Figura 14. Diagrama funció analitzadora comandes introduïdes .....	17
Figura 15. Pololu Dual MC33926 Motor Driver Shield .....	18
Figura 16. Esquema connexionat entre driver de motor i microcontrolador .....	18
Figura 17. Estructura física .....	20
Figura 18. Esquema connexionat Arduino Due, Pololu Dual MC33926 i Yumo E6A2-CS3E.....	21
Figura 19. Vista zenital del sistema implementat .....	21
Figura 20. Diagrama sistema de control en llaç obert .....	22
Figura 21. Diagrama sistema de control en llaç tancat amb controlador .....	22
Figura 22. Relació increment període timer i velocitat motor en mode 16 passos.....	23
Figura 23. Diagrama funció analitzadora dades port sèrie Arduino .....	25
Figura 24. Entrada escaló generada amb C#.....	26
Figura 25. Entrada rampa generada amb C#.....	27
Figura 26. Entrada sinusoïdal generada amb C#.....	27
Figura 27. Interfície C# .....	28
Figura 28. Comportament sistema i error entrada escaló amb controlador PI .....	29
Figura 29. Comportament sistema i error entrada rampa amb controlador PI.....	30
Figura 30. Comportament sistema i error entrada sinusoïdal amb controlador PI .....	30
Figura 31. Comportament sistema i error entrada escaló amb controlador exponencial.....	31
Figura 32. Comportament sistema i error entrada rampa amb controlador exponencial .....	32
Figura 33. Comportament sistema i error entrada sinusoïdal amb controlador exponencial....	32
Figura 34. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada manual .....	33
Figura 35. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada escaló .....	34
Figura 36. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada rampa .....	34
Figura 37. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada sinusoïdal .....	35

# 1. Introducció

En l'actualitat, s'ha produït un increment en l'ús dels motors pas a pas ja que són utilitzats principalment en la robòtica i les impressores 3D, uns mercats que estan en ple creixement.

Aquests motors es classifiquen tant per la seva construcció física com per la construcció de les seves bobines i tenen diferents maneres de ser controlats, unes més precises i eficients que altres.

En aquest projecte es vol trobar una manera eficient de controlar aquest tipus de motors i per això es dissenyarà un sistema de control en llaç tancat en el que s'implementaran diferents controladors per tal de reduir l'error de posicionament, velocitat i el consum energètic.

Per exemple, Gheorghe Baluta [1] va utilitzar el mode de micropassos per controlar un motor pas a pas mitjançant circuits integrats L292 de SGS-THOMSON. Segons l'autor, el control d'un motor pas a pas mitjançant el mode de micropassos, millora la precisió de moviment i elimina l'arissat i els efectes de ressonància a baixes velocitats. S'apliquen dos ones desfasades  $90^\circ$  entre elles a les fases del motor, és a dir, un cosinus i un sinus. Les conclusions a les que es va arribar van ser una reducció en els efectes de ressonància i el soroll generat, un control més precís de la posició i una resolució molt alta de l'angle de pas.

Altres autors, com M. Zribi i J. Chiasson [2] van proposar un control en llaç tancat. En aquest cas van considerar implementar un sistema de control en llaç tancat per controlar un motor pas a pas ja que consideraven que en un sistema de control en llaç obert, el motor tenia un rendiment molt baix i es podia produir una pèrdua de passos. Els autors van trobar una transformació no lineal que transformava el sistema no lineal del motor a un controlador no lineal. Les conclusions a les que es va arribar van ser que aquest sistema de control era superior al de llaç obert degut a la ràpida resposta sense sobrepic.

Finalment, autors com en Petar Crnošija et al [3] van proposar diferents algoritmes per el control de motors pas a pas híbrids en sistemes de control de llaç tancat. L'estudi buscava trobar l'angle òptim de control dels motors pas a pas híbrids utilitzant un amplificador "chopper" i un controlador de corrent. Les conclusions a les que es va arribar van ser que els algoritmes òptims pel control en llaç tancat dels motors pas a pas híbrids provocaven un augment del rendiment, fiabilitat i parell de força respecte als sistemes de control de llaç obert. L'algoritme òptim de control facilita l'acceleració més alta a totes les velocitats angulars i el mínim temps de posicionament.

## 2. Objectius

En aquest projecte s'han proposat quatre objectius exposats a continuació:

- Estudiar el motor pas a pas.
- Fer un sistema de control en llaç tancat mitjançant un codificador rotatiu (encoder).
- Minimitzar el consum del motor.
- Implementar un controlador.

## 3. Material

En els següents apartats, es pot veure el material utilitzat en l'elaboració d'aquest projecte, juntament amb les seves característiques principals.

### 3.1. Motor pas a pas

#### 3.1.1. Definició

Un motor pas a pas, com a qualsevol motor, es un convertidor electromecànic, que transforma energia elèctrica en mecànica.

Mentre que un motor convencional gira lliurement quan se li aplica una tensió, el motor pas a pas gira un determinat angle de forma incremental, la qual cosa permet que aquest realitzi desplaçaments angulars fixos molt precisos.

Els motor, tant de corrent continua com de corrent alterna, són molt eficients en moltes tasques quotidianes però, degut a problemes tals com la inèrcia mecànica o la seva dificultat per controlar la seva velocitat, es van desenvolupar altres tipus de motor que tenen com a principal característica la precisió de gir.

Aquests motors són ideals quan el que es vol és un posicionament amb un grau elevat d'exactitud y una molt bona regulació de la velocitat.

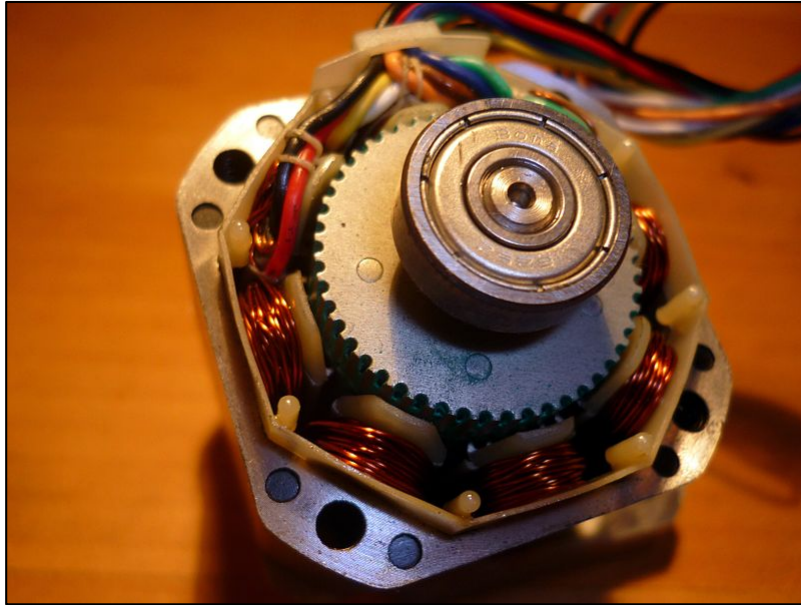
Les seves principals aplicacions es poden trobar en robòtica, tecnologia aeroespacial, impressores 3D, manipulació i posicionament d'eines i peces en general.

Estan constituïts per dues parts:

- Estator: part fixa construïda a base de cavitats en les que van depositades les bobines
- Rotor: part mòbil construïda mitjançant un imant permanent

Aquest conjunt va muntat sobre un eix suportat per dos coixinets que li permeten girar lliurement.

En la Figura 1 es pot veure una imatge que mostra l'estructura interior d'un motor pas a pas.



*Figura 1. Estructura interna motor pas a pas*

La precisió i repetibilitat que presenten aquest tipus de motors l'habiliten per treball en sistemes en llaç obert sense realimentació.

Algunes de les avantatges que presenten són:

- Cost baix pel control aconseguit
- Alt parell de força en arrancada i velocitats baixes
- Robustesa
- Simplicitat de construcció
- Necessiten poc manteniment
- Fiabilitat alta
- Excel·lent resposta a l'arrancada, parada o canvi de sentit
- L'angle de rotació del motor és proporcional al pols d'entrada
- Posicionament precís

### 3.1.2. Tipus

En els motors pas a pas, es poden distingir tres tipus des del punt de vista de la seva construcció: els de reluctància variable, els d'imant permanent i els híbrids.

En els de reluctància variable, el rotor està fabricat per un cilindre de ferro dentat i l'estator està format per bobines. Aquest tipus de motor treballa a major velocitat que els d'imant permanent.

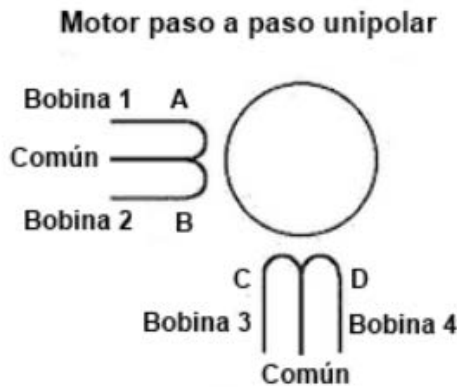
En els motor d'imant permanent, el rotor és un imant que posseeix una ranura en tota la seva longitud i l'estator està format per una sèrie de bobines enrotllades al volta d'un nucli o pol. Aquests són els motors pas a pas més utilitzats i els més senzills d'utilitzar.

Per últim, els híbrids, serien una combinació dels anteriors, aconseguint un alt rendiment a una bona velocitat.



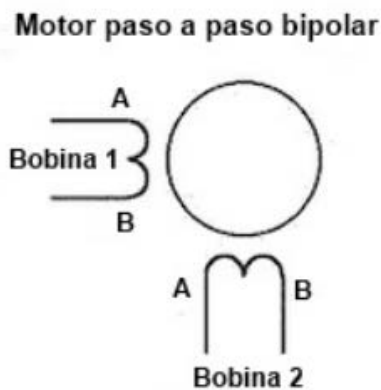
Un cop vistos els diferents tipus de motors pas a pas des del punt de vista físic, s'exposarà la seva classificació segons la construcció de les bobines de l'estator, dividint-los en dos tipus, unipolars i bipolars.

En els motors unipolars, la corrent que circula pels bobinats sempre circula en el mateix sentit. Es caracteritzen per ser més fàcils de controlar i tenen 5 o 6 cables de sortida. En la Figura 2 es pot veure l'esquema de les bobines d'aquest tipus de motor.



*Figura 2. Esquema bobines motor pas a pas unipolar*

En els motors bipolars, la corrent que circula pels bobinats canvia de sentit en funció de la tensió que se'ls hi aplica. Tenen un control més complex que els unipolars i tenen 4 cables de sortida. En la Figura 3 es pot veure l'esquema de les bobines d'aquest tipus de motor.



*Figura 3. Esquema bobines motor pas a pas bipolar*

Els motors bipolars tenen aproximadament un 30% més de parell que un motor equivalent unipolar del mateix volum. La raó d'això és que només la meitat d'una bobina és energitzada en un moment donat en un motor unipolar. Un motor bipolar utilitza la totalitat d'una bobina quan està energitzat.

Com s'ha comentat anteriorment, els motors bipolars requereixen circuits de control més complexos que els motors unipolars, provocant un impacte negatiu en el cost econòmic de l'aplicació.

Ja que l'objectiu principal d'aquest projecte és el disseny d'un sistema de control per a un motor pas a pas, s'utilitzarà un motor pas a pas híbrid i de tipus bipolar.

### 3.1.3. Principi de funcionament

Els motors elèctrics, en general, basen el seu funcionament en les forces exercides per un camp electromagnètic i creades al fer circular una corrent elèctrica a través d'una o varies bobines.

A l'excitar l'estator, es crearan els pols N-S, provocant la variació del camp magnètic format. La resposta del rotor serà seguir el moviment d'aquest camp, és a dir, orientarà els seus pols N-S cap als pols S-N de l'estator, respectivament. Quan el rotor arribi a aquesta posició d'equilibri, l'estator canvia l'orientació dels seus pols i tractarà de buscar la nova posició d'equilibri. Mantenint aquesta situació de manera continuada, s'aconseguirà un moviment giratori i continuat del rotor, produint-se d'aquesta manera el gir d l'eix del motor i a la vegada la transformació d'una energia elèctrica en una altra de mecànica en forma de moviment circular.

Al número de graus que gira el rotor, quan s'efectua un canvi de polaritat a les bobines de l'estator, se l'anomena angle de pas.

Existeix la possibilitat d'aconseguir una rotació de mig pas amb el control electrònic apropiat. Els motors estan dissenyats per treballar en un rang de freqüències determinat pel fabricant y un cop es supera aquesta rang, es provocarà la pèrdua de sincronització.

Els motors pas a pas, es controlen pel canvi de direcció del flux de corrent a través de les bobines que el formen. Això permet controlar el desplaçament del rotor en funció de les tensions que s'apliquen a les bobines, controlar el número de passos per volta y controlar la velocitat del motor.

A més a més, aquests motors tenen l'habilitat de poder quedar enclavats en una posició, si una o més bobines estan energitzades, o totalment lliures, si no circula corrent per cap de les bobines.

Els aspectes més importants a conèixer d'un motor pas a pas són saber el tipus de motor que és, la potència, el nombre de passos, el parell de força i la tensió d'alimentació.

Ja que en aquest projecte s'utilitzarà un motor pas a pas de tipus bipolar, es procedirà a explicar el principi de funcionament concret d'aquest tipus de motor.

Els modes més utilitzats per controlar un motor pas a pas bipolar són: el pas complet, el mig pas i el micropas. Aquest modes tenen un efecte sobre les propietats de funcionament i el parell de força que entrega el motor.

Per tal d'utilitzar els diferents modes anomenats anteriorment, serà necessari l'ús d'un pont en H per cada bobina que ens facilitarà els canvis de polaritat necessaris per dur a terme els diferents passos de cada mode. El controlador de motor vist a l'apartat de material ens proporciona un pont en H per cada bobina mitjançant les sortides del motor A i el motor B.

A continuació, en la Figura 4 i la Figura 5 es poden veure l'esquema i una demostració del funcionament del pont en H.

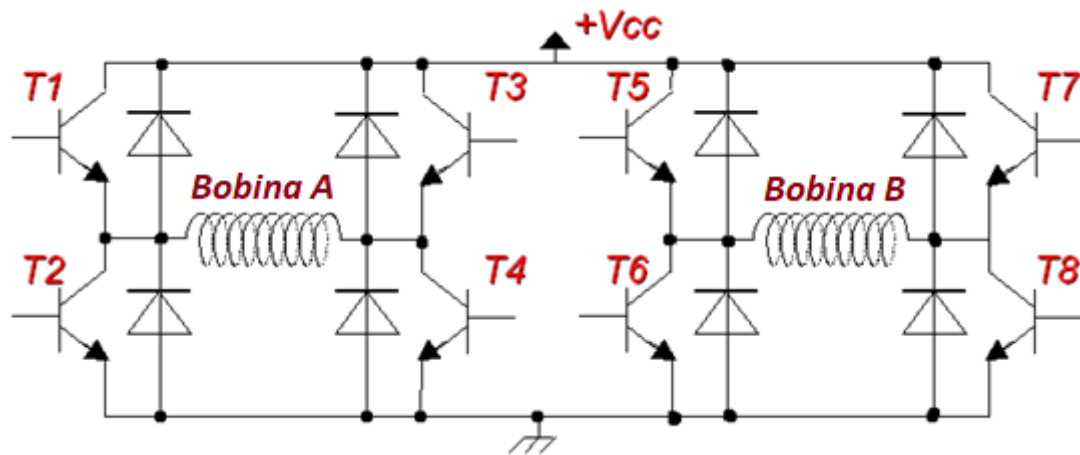


Figura 4. Ponts en H per cada bobina del motor

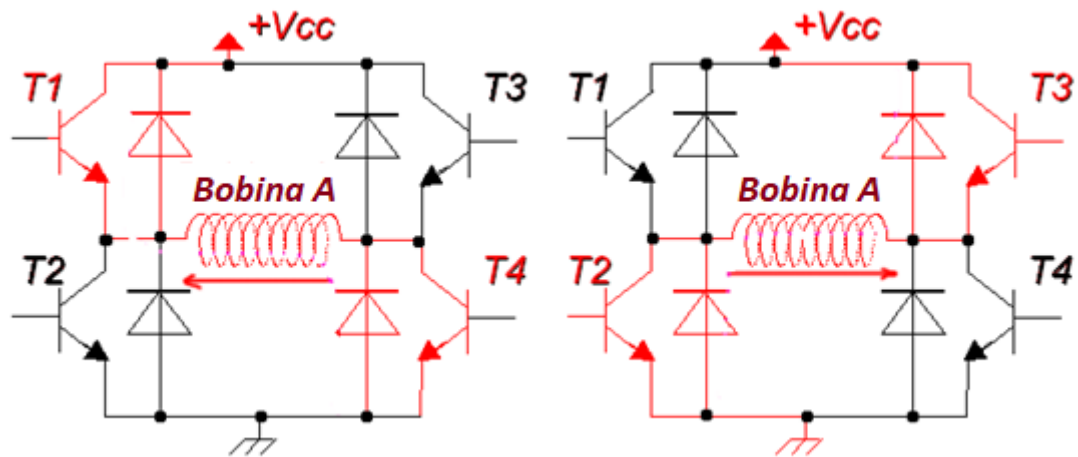


Figura 5. Exemple funcionament pont en H bobina A

Seguidament, s'explicaran de manera detallada els modes exposats anteriorment:

- Pas complet

En aquest mode, només una bobina està activa a cada pas, en un total de 4 passos. El mode de pas complet requereix la menor quantitat de corrent del controlador de motor, en comparació amb tots els altres diferents modes de funcionament. En la Taula 1, la Figura 6 i la Figura 7, es pot veure la seqüència de les polaritats de les bobines en el mode de pas complet.

Taula 1. Seqüència polaritats bobines mode pas complet

Pas	Bobina A		Bobina B	
	A1	A2	B1	B2
1	+	-		
2			+	-
3	-	+		
4			-	+

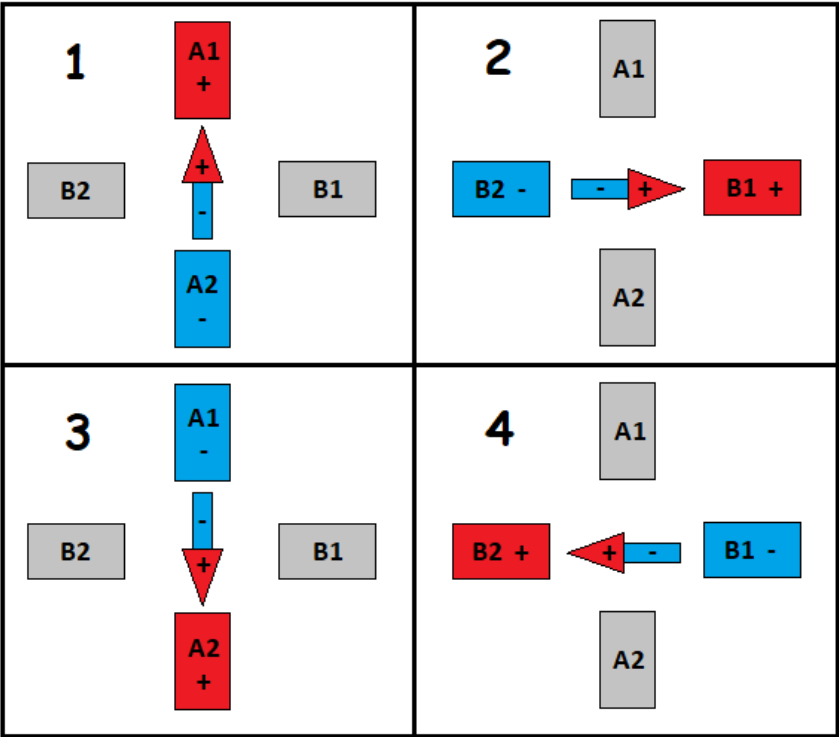
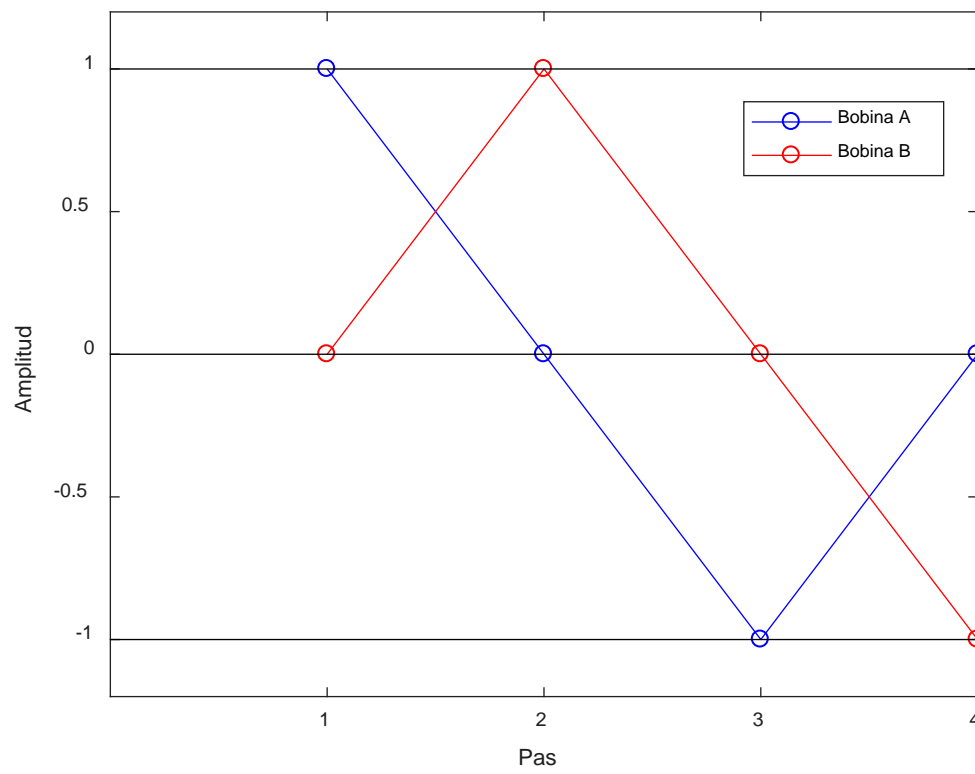


Figura 6. Seqüència polaritats bobines mode pas complet



*Figura 7. Seqüència polaritats bobines mode pas complet mitjançant Matlab*

- Mig pas

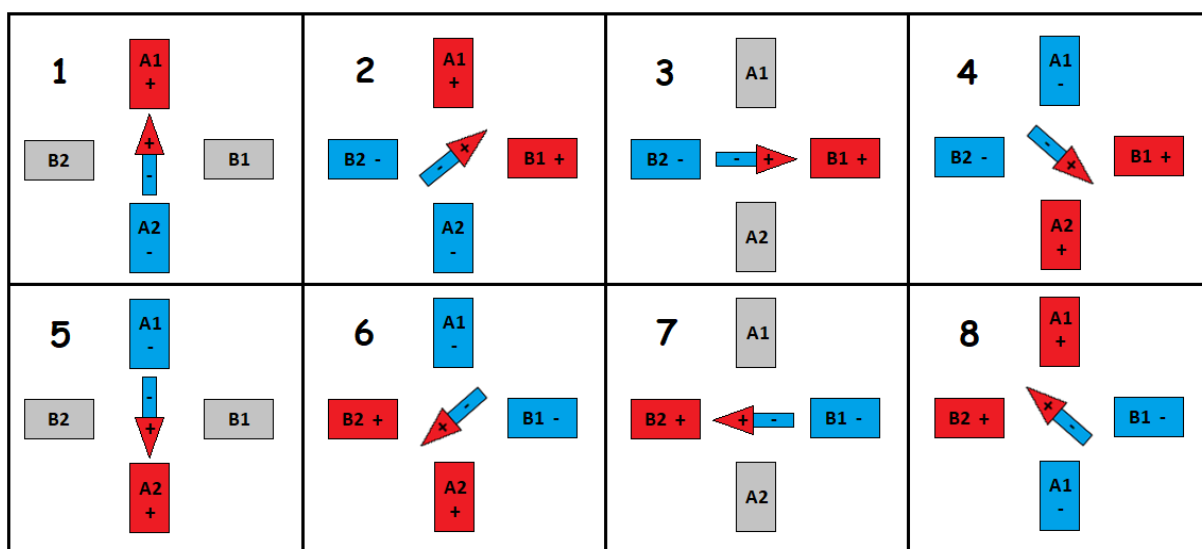
En aquest mode, el controlador del motor varia entre una bobina activa i dues bobines actives alhora, en un total de 8 passos. L'angle de desplaçament del motor és la meitat que en el mode de pas complet. Aquest fet fa que el gir del motor sigui més suau ja que la resolució angular de gir és major.

El mode de mig pas produeix menys de parell de força de motor que el mode de pas complet. Aquest comportament es pot corregir incrementant la corrent aplicada quan només actua una bobina.

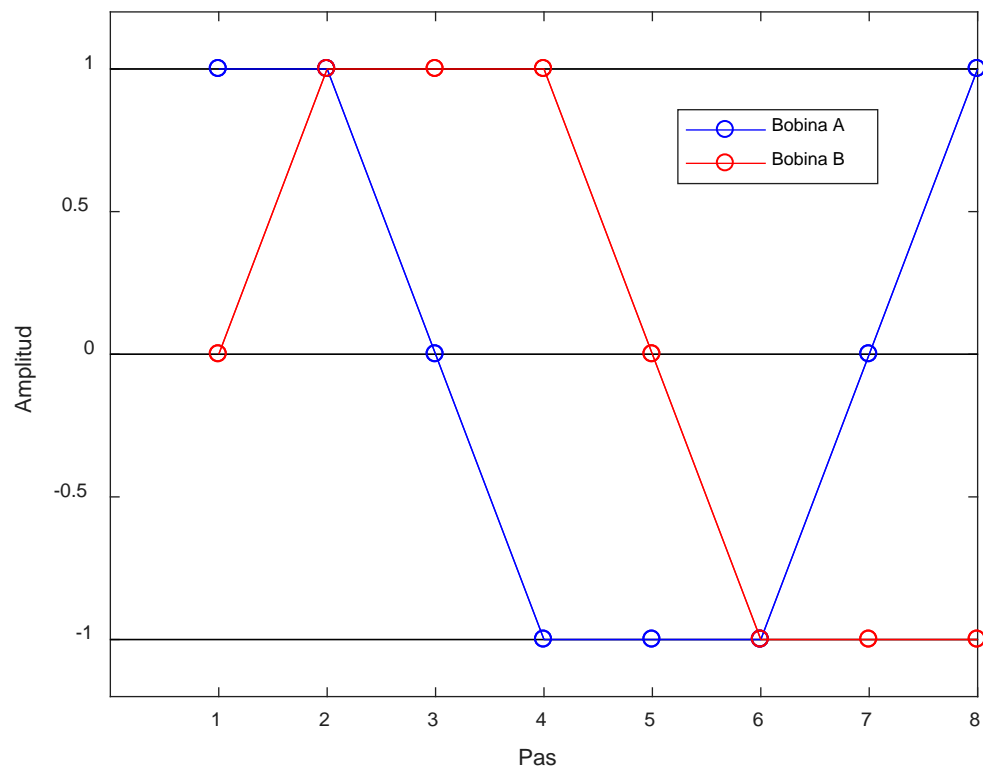
En la Taula 2, la Figura 8 i la Figura 9, es pot veure la seqüència de les polaritats de les bobines en el mode de mig pas.

*Taula 2. Seqüència polaritats bobines mode mig pas*

	Bobina A		Bobina B	
Pas	A1	A2	B1	B2
1	+	-		
2	+	-	+	-
3			+	-
4	-	+	+	-
5	-	+		
6	-	+	-	+
7			-	+
8	+	-	-	+



*Figura 8. Seqüència polaritats bobines mode mig pas*



*Figura 9. Seqüència polaritats bobines mode mig pas mitjançant Matlab*

- Micropassos

Aquest mètode pot dividir un pas bàsic del motor fins a 256 vegades, fent que els passos petits siguin encara més petits. El controlador utilitza dos ones sinusoidals desfasades  $90^\circ$ , és a dir, un sinus per una bobina i un cosinus per l'altra. Quan s'utilitza aquest mètode, el motor es mou de manera suau i els canvis de passos es fan inapreciables.

Controlant la direcció i l'amplitud de la corrent que circula per cada bobina, la resolució incrementa i les característiques del motor milloren, produint una menor vibració.

Ja que les ones sinusoidals actuen juntes, la transició d'una bobina a l'altra és més suau perquè quan la corrent augmenta en una bobina, disminueix en l'altra. Aquest fet també provoca que el parell de força del motor es mantingui constant en tots els passos.

En la Figura 10 i la Figura 11, es pot veure la seqüència de les polaritats de les bobines en el mode de micropassos.

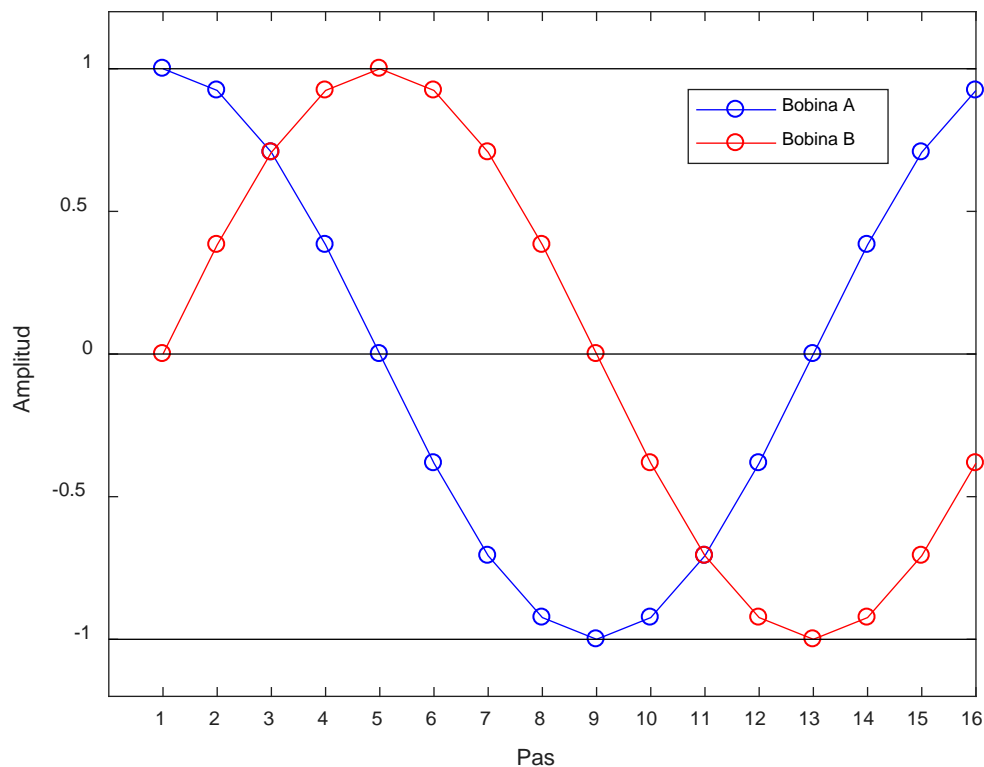


Figura 10. Seqüència polaritats bobines mode 16 micropassos mitjançant Matlab



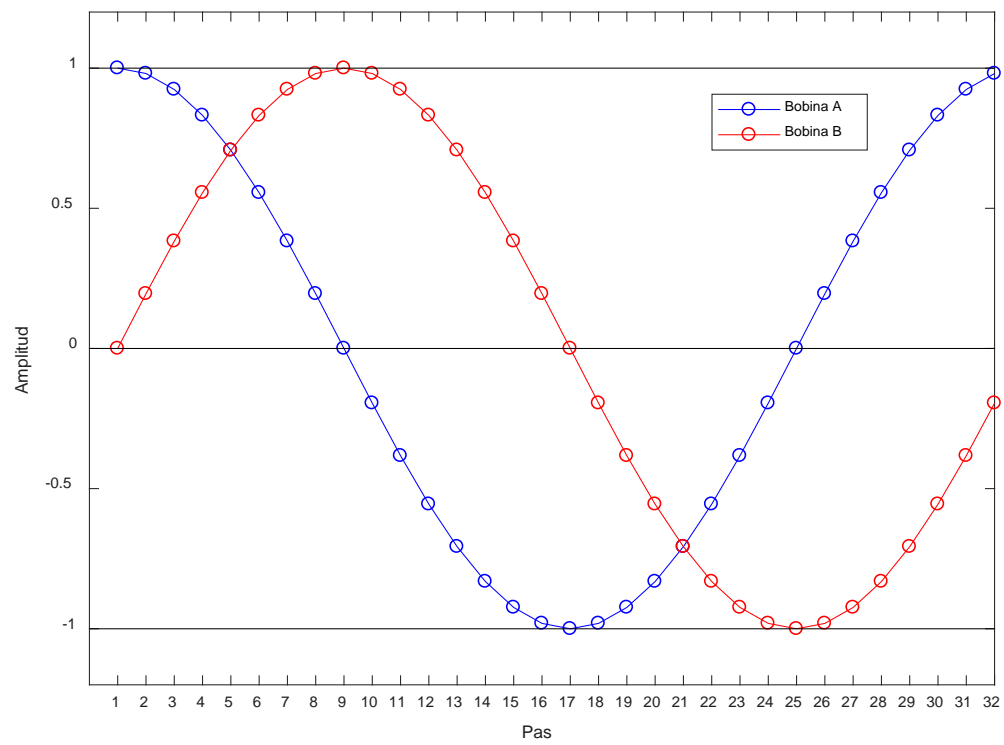


Figura 11. Seqüència polaritats bobines mode 32 micropassos mitjançant Matlab

### 3.1.4. Problemàtica

Un problema amb el que no es comptava que va sorgir en la realització d'aquest projecte, va ser la quantitat de soroll que feia el motor, el qual era elevat i de vegades impedia treballar amb comoditat.

Per tal d'intentar solucionar aquest problema es va dur a terme una recerca sobre quin fenomen produïa aquest soroll i les seves diferents tonalitats.

El fenomen que fa que el motor produeixi soroll és l'anomenat "current chopping", el qual es provoca quan s'utilitza un PWM per activar i desactivar els ponts en H vistos anteriorment a l'hora de fer funcionar el motor pas a pas, canviant la corrent aplicada a les bobines d'aquest. Depenent de la velocitat a la que s'activen i desactiven, la tonalitat és més aguda o més greu.

Utilitzar un PWM per regular la corrent realment converteix el motor pas a pas en una mena d'altaveu ja que es disposa dels mateixos elements: un imant permanent (rotor), un electroimant (stator) i una senyal modulada (PWM).

Per disminuir el soroll es van valorar diferents mètodes:

- Disminuir la corrent

Quan es redueix la corrent aplicada a les bobines es disminueix el soroll. La contrapartida d'aquest mètode és que quan es disminueix la corrent aplicada a les bobines, es perd parell de força en el motor i en cas de disminuir-la en excés, el motor podria començar a perdre passos fins el punt d'aturar-se. Un cop valorades les desavantatges, s'ha descartat aquest primer mètode.

- Incrementar la freqüència de canvi del PWM

Quan s'incrementa la freqüència de canvi del PWM, també es redueix el soroll. Aquest paràmetre, es pot canviar modificant una llibreria interna de l'arduino localitzada a l'ordinador. Per reduir el soroll, la freqüència ha de ser superior a 20 KHz, considerant el rang audible de l'oïda humana, però no és recomanable augmentar-la en excés ja que provocaria un augment de temperatura interna del motor. El valor recomanat es situa entre 30 KHz i 50 KHz. En aquest projecte s'ha utilitzat una freqüència de canvi de 50 KHz, reduint molt el soroll que produïa el motor i mantenint el mateix rendiment.

### 3.1.5. Model escollit

El model de motor pas a pas escollit ha estat el motor pas a pas bipolar híbrid Motech MT-1704HS168A [4] (Figura 12). A la Taula 3 es poden veure les especificacions tècniques d'aquest motor pas a pas.



*Figura 12. Motor pas a pas híbrid bipolar Motech MT-1704HS168A*

*Taula 3. Especificacions tècniques motor pas a pas híbrid bipolar Motech MT-1704HS168A*

Característica	Valor
Angle de pas	1.8°
Precisió angle de pas	1.8° ± 5% (mode pas complet)
Precisió de resistència	± 10%
Precisió d'inductància	± 20%
Augment de temperatura	85°C màx
Resistència d'aïllament	100 MΩ , 500 VDC
Força dielèctric	500 VAC durant un minut
Màxima força radial	28 N
Màxima força axial	10 N
Voltatge recomanat	12-24 VDC
Corrent màxima	1.68 A/Fase
Parell de manteniment	5.5 Kg·cm
Parell de detenció	200 g·cm
Resistència	1.65 Ω/Fase
Inductància	2.8 mH/Fase
Inèrcia	68 g·cm <sup>2</sup>
Pes	0.35 Kg

3.2. Arduino Due

El microcontrolador utilitzat ha estat l'Arduino Due [5] (Figura 13). A la Taula 4 es poden veure les especificacions tècniques d'aquest microcontrolador.

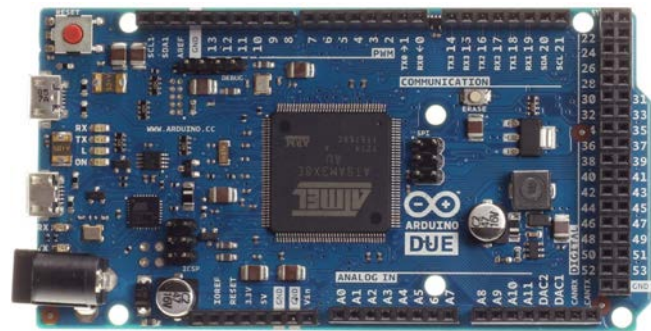
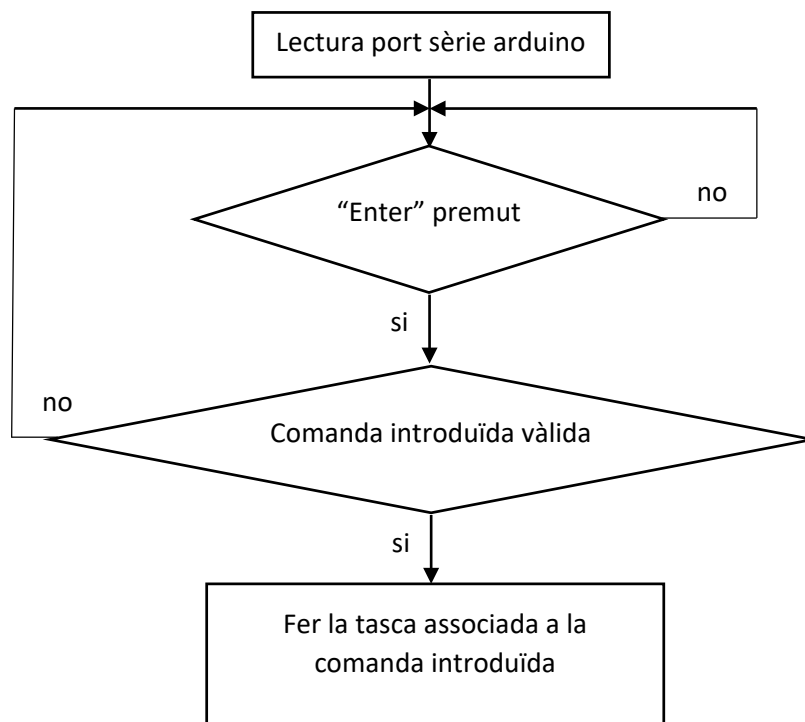


Figura 13. Microcontrolador Arduino Due

Taula 4. Especificacions tècniques microcontrolador Arduino Due

Característica	Valor
Microcontrolador	AT91SAM3X8E
Voltatge de funcionament	3.3 V
Voltatge d'entrada (recomanat)	7-12 V
Voltatge d'entrada (límits)	6-16 V
Pins digitals I/O	54
Pins analògics d'entrada	12
Pins analògics de sortida	2 (DAC)
Corrent DC al pin de 3.3 V	800 mA
Corrent DC al pin de 5 V	800 mA
Memoria flash	512 KB
SRAM	96 KB
Velocitat de rellotge	84 MHz
Llargada	101.52 mm
Amplada	53.3 mm
Pes	36 g

El diagrama de la funció d'arduino que analitza les comandes introduïdes pel port sèrie es pot veure a la Figura 14.



*Figura 14. Diagrama funció analitzadora comandes introduïdes*

3.3. Driver de motor

El driver de motor utilitzat és el Pololu Dual MC33926 Motor Driver Shield [6] (Figura 15). A la Taula 5 es poden veure les especificacions tècniques d'aquest driver de motor. Finalment, a la Figura 16 es pot veure l'esquema de connexionat entre el driver de motor i el microcontrolador.

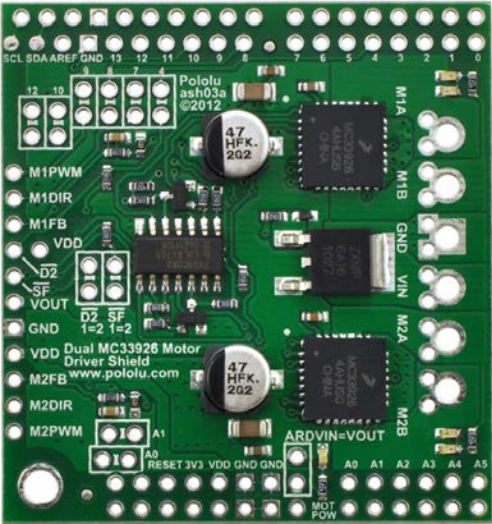


Figura 15. Pololu Dual MC33926 Motor Driver Shield

Taula 5. Especificacions tècniques Pololu Dual MC33926 Motor Driver Shield

Característica	Valor
Voltatge d'alimentació	5-28 VDC
Corrent de sortida	3 A per motor
Voltatge entrades	3.3 VDC / 5 VDC
Rang operació PWM	Fins a 20 KHz

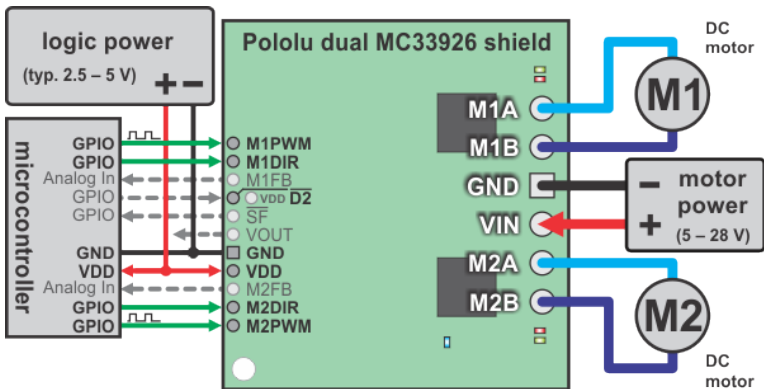



Figura 16. Esquema connexionat entre driver de motor i microcontrolador

### 3.4. Encoder

L'encoder utilitzat ha estat el Yumo E6A2-CS3E [7]. La Taula 6 mostra la seva imatge i les seves especificacions tècniques.


*Taula 6. Imatge i especificacions tècniques encoder Yumo E6A2-CS3E*

Imatge	Característica	Valor
	Voltatge d'alimentació	5-12 VDC
	Resolució	200 ppv
	Fase de sortida	A

### 3.5. Font d'alimentació

La font d'alimentació utilitzada és la S-360-12 [8]. La Taula 7 mostra la seva imatge i les especificacions tècniques.

*Taula 7. Imatge i especificacions tècniques font alimentació S-360-12*

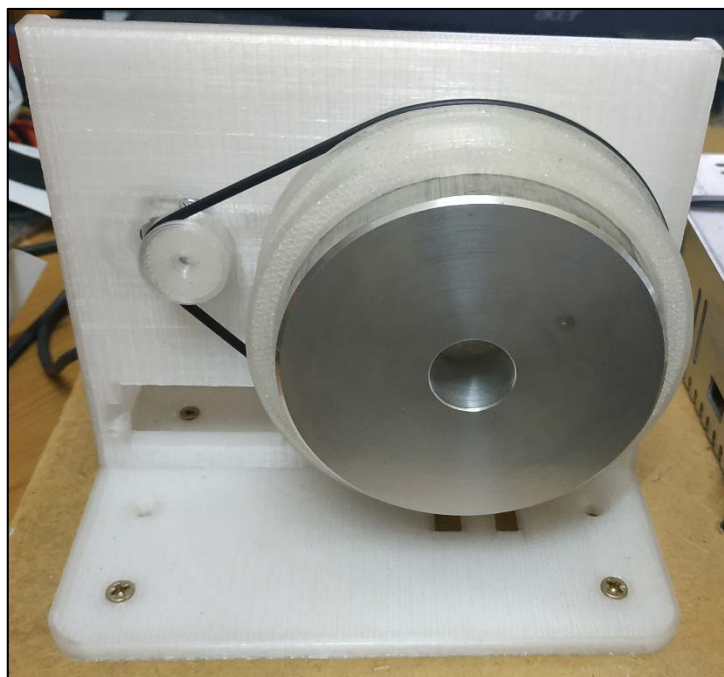
Imatge	Característica	Valor
	Voltatge d'entrada	110-220 VAC
	Voltatge de sortida	12 VDC
	Corrent de sortida	30 A

### 3.6. Estructura física

A la Figura 17 es pot veure l'estructura física on van muntats el motor i l'encoder a la part posterior. A la part frontal, hi han dues politges de diferents mides (20 i 100 mm) unides per una goma per a que girin de manera solidària una amb l'altra.

El motor pas a pas fa girar la politja gran, transmetent el moviment a la politja petita que fa girar l'encoder, comptant aquest passos cada cop que rep un estímul. Això permet saber la velocitat a la que va el motor.

La politja gran conté un volant d'inèrcia d'alumini per tindre un cert grau d'inèrcia quan aquest accelera.



*Figura 17. Estructura física*



### 3.7. Connexionat

En la Figura 18 es pot veure un esquema del connexionat dels elements utilitzats en el projecte. Els pins 12 i 13 (PWM) controlen el voltatge de cada bobina, els pins 24 i 28 (digitals) inverteixen la corrent dels ponts en H per tal de variar la polaritat de les bobines A i B del motor. Els pins A8 i A10 (analògics) llegeixen la corrent subministrada a les bobines A i B del motor. El pin 50 (digital) llegeix els polsos de l'encoder mitjançant una interrupció. Finalment, el pin 25 (digital) permet activar i desactivar el driver de motor. Finalment, la Figura 19 és una imatge on es veu el muntatge del projecte, juntament amb el connexionat.

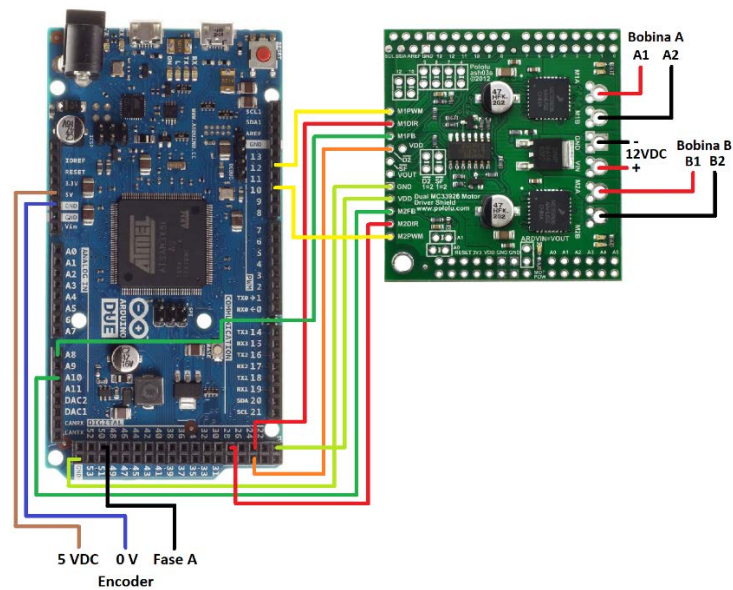


Figura 18. Esquema connexionat Arduino Due, Pololu Dual MC33926 i Yumo E6A2-CS3E

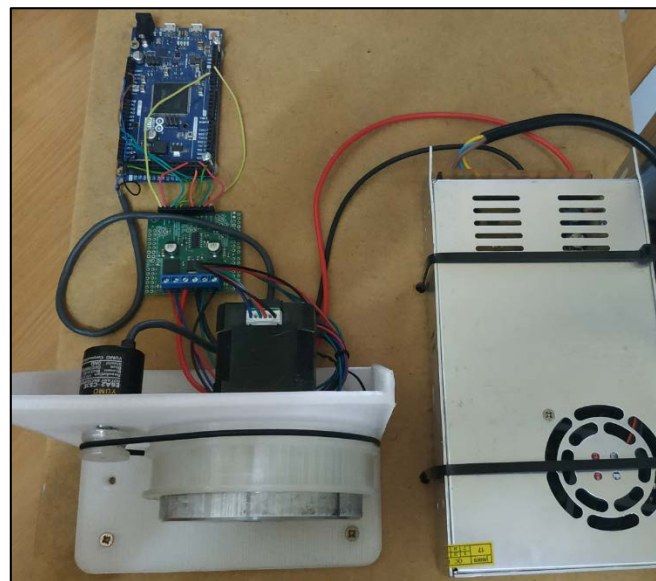


Figura 19. Vista zenital del sistema implementat

## 4. Algoritmes de control

Majoritàriament, els motors pas a pas s'utilitzen en sistemes en llaç obert (Figura 20), és a dir, sense realimentació, ja que una de les seves principals avantatges és la seva simplicitat d'utilització en aquest tipus de sistemes de control.

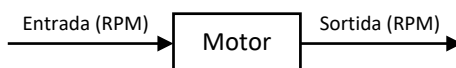


Figura 20. Diagrama sistema de control en llaç obert

Un dels principals objectius d'aquest projecte ha estat el d'aconseguir un sistema de control en llaç tancat (Figura 21) per tal de poder monitoritzar en tot moment el comportament del motor. Per tal d'obtenir aquest tipus de sistema, s'ha utilitzat un encoder.

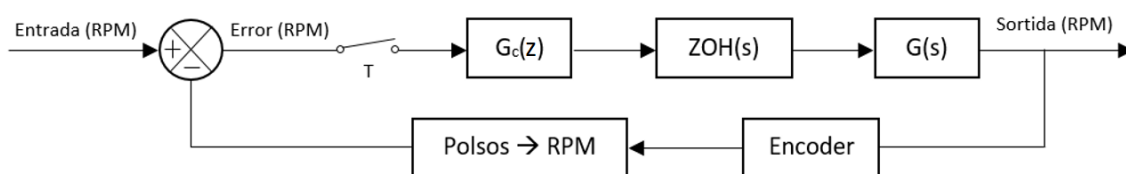


Figura 21. Diagrama sistema de control en llaç tancat amb controlador

Les dades del motor a monitoritzar han estat el voltatge i la corrent aplicats en cada bobina i la velocitat i posició del motor.

A l'hora d'escollir quin tipus de controlador seria utilitzat en aquest projecte, s'ha tingut en compte el fet de que en un motor pas a pas no es pot augmentar la velocitat d'aquest de forma sobtada ja que es produiria el fenomen de pèrdua de passos i el motor s'aturaria.

Per tal de controlar la velocitat del motor, es modifica el període del timer que controla la velocitat a la que les bobines canvien de polaritat. Quan aquest disminueix, augmenta la velocitat del motor i viceversa.

L'increment del període del timer comentat anteriorment no es lineal, ja que quan la velocitat del motor és baixa, aquest increment és molt més gran que quan la velocitat és alta.

L'equació 1 mostra la relació matemàtica que calcula el període del timer necessari per a que el motor vagi a la velocitat especificada.

$$t_1 = \frac{60}{\frac{\text{mode passos}}{2} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot rpm} [\mu s] \quad (1)$$

A continuació, es pot veure a la Figura 22 la representació gràfica de la relació entre l'increment del període del timer i la velocitat del motor exposada en l'equació 1 en el cas en el que el motor funciona en el mode de 16 passos.

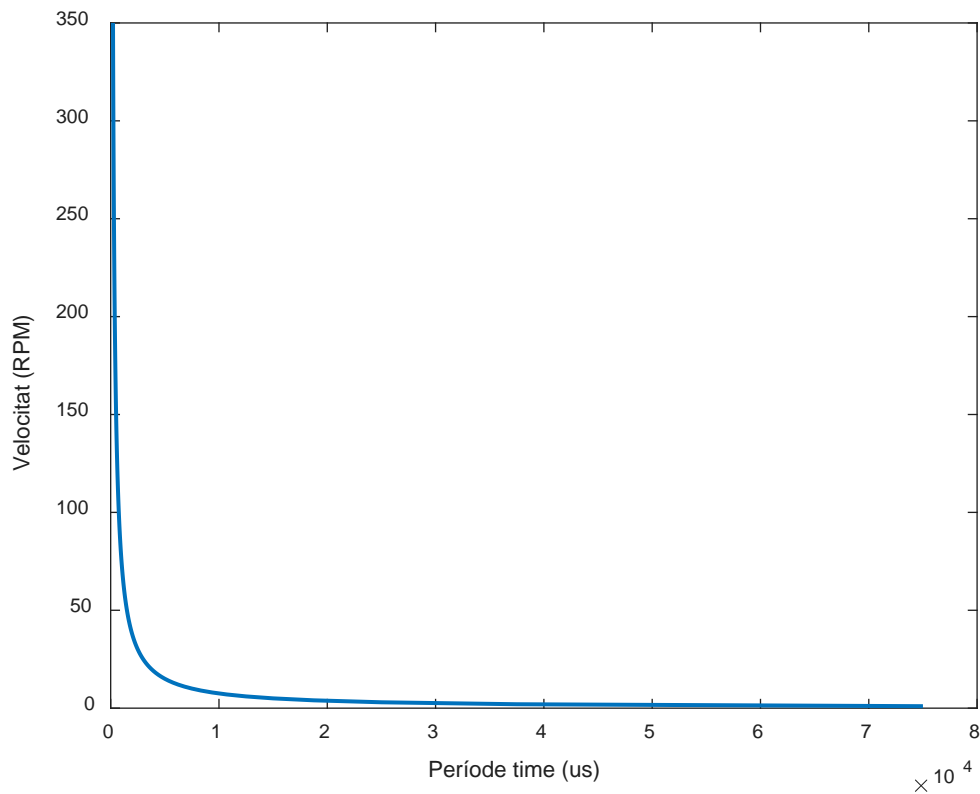


Figura 22. Relació increment període timer i velocitat motor en mode 16 passos

#### 4.1. Proporcional-integral

El primer tipus de controlador que s'aplicarà serà un controlador proporcional-integral. La relació matemàtica d'aquest controlador es pot veure a l'equació 2.

$$rpm = rpm + K_p \cdot error + K_i \cdot errorAcumulat \quad (2)$$

Aquest controlador varia la velocitat en funció de l'error i l'error acumulat. A mesura que l'error es redueix, la variació de velocitat és més petita.

Es provaran diferents valors de les variables  $K_p$  i  $K_i$  fins aconseguir el comportament més estable del sistema i amb menys error per cada entrada.

## 4.2. Exponencial

El segon tipus de controlador que s'aplicarà serà un controlador exponencial. Aquest controlador variarà l'increment de la velocitat com es pot veure a l'equació 3.

$$incRPM = v \cdot e^{\frac{rpm \cdot x}{180}} \quad (3)$$

Aquest increment es sumarà o restarà a la velocitat actual depenent de si l'error és major o menor que zero com es pot veure a l'equació 4.

$$rpm = rpm \pm incRPM \quad (4)$$

De la mateixa manera que amb el controlador anterior, quan l'error es redueixi també es reduirà l'increment de velocitat.

En aquest cas, es provaran diferents valors de les variables  $v$  i  $x$  per tal d'aconseguir el menor error possible envers a les entrades donades.

## 4.3. Voltatge

Utilitzant les dades de voltatge i corrent aplicats en cada bobina, proporcionades per el driver de motor, es pot optimitzar el consum del motor, aplicant només el voltatge necessari a la velocitat de gir especificada enlloc d'aplicar el màxim voltatge, independentment de la velocitat de gir.

Quan la velocitat del motor augmenta, la corrent que necessita aquest per mantenir aquesta velocitat també augmenta. Aquest fet provoca que el voltatge aplicat al motor també hagi d'augmentar ja que sinó hi hauria una pèrdua de passos, quedant el motor aturat.

Aquest controlador augmentarà o disminuirà el voltatge aplicat al motor per mantenir-se dintre d'uns marges de corrent especificats seguint la relació matemàtica de l'equació 5.

$$voltatge = volatge \pm 0.001 \quad (5)$$

S'ha analitzat el mínim voltatge a aplicar per tal de que el motor comenci a moure's i ha estat de 5 V. El màxim voltatge aplicat al motor, serà de 12 V ja que ve limitat per la font d'alimentació utilitzada en aquest projecte.

## 5. Interfície

Per tal de disposar d'una manera fàcil a l'hora de controlar i monitoritzar el funcionament del motor pas a pas, s'ha creat una interfície gràfica mitjançant el llenguatge de programació C# i el programa Microsoft Visual Studio.

La interfície està dividida en diferents part que s'activaran i es desactivaran depenent de les opcions seleccionades, per evitar possibles errors.

Per tal de veure com es comporta el motor a l'hora de seguir diferents senyals d'entrada, es generaran senyals de tipus escaló, rampa i sinusoidal.

Aquestes senyals es generaran mitjançant la pròpia interfície del C#, en la qual es podrà assignar el màxim, el mínim, l'amplitud i el període de cadascuna d'elles.

En la Figura 23 es pot veure el diagrama de la funció analitzadora de les dades que envia l'arduino per port sèrie i analitza el C#.

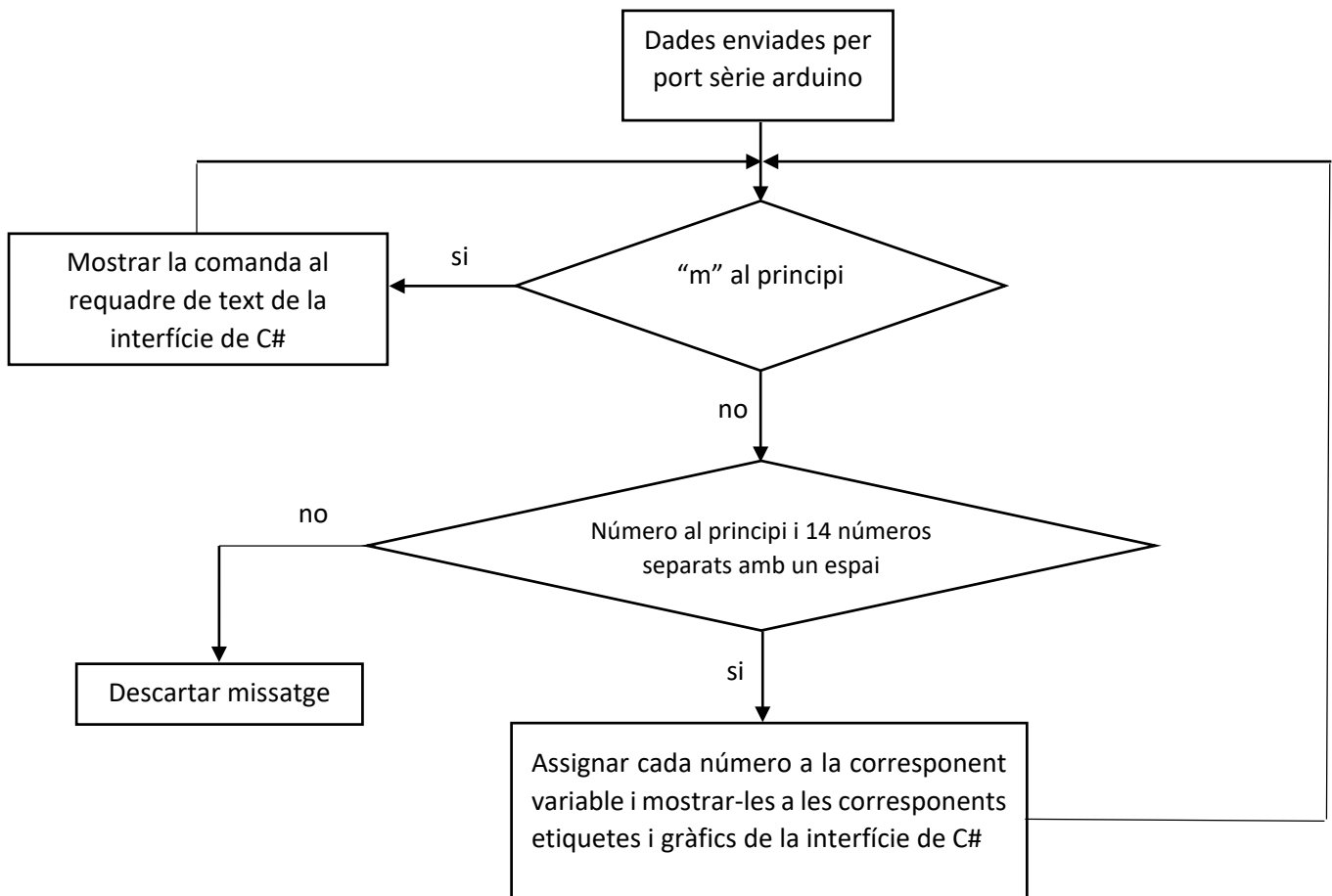


Figura 23. Diagrama funció analitzadora dades port sèrie Arduino

## 5.1. Entrada escaló

L'entrada escaló serà generada de manera simple, quan el període de la senyal sigui inferior a la meitat del període total s'aplicarà l'equació 6 i quan sigui superior l'equació 7.

$$refSpeed = max \quad (6)$$

$$refSpeed = min \quad (7)$$

En la Figura 24 es pot veure l'entrada escaló generada amb C#.

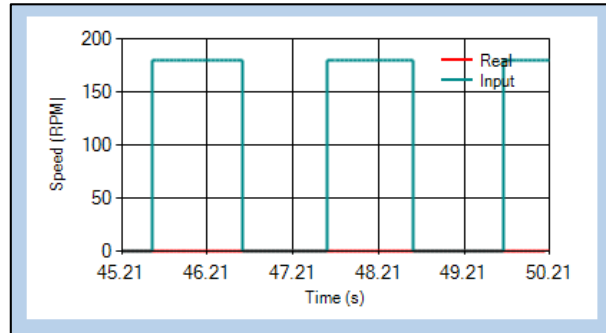


Figura 24. Entrada escaló generada amb C#

## 5.2. Entrada rampa

Per generar l'entrada rampa, s'utilitzaran dues rectes. Quan el període de la senyal sigui inferior a la meitat del període total, la recta generada serà la de l'equació 8 i quan sigui superior la de l'equació 9.

$$refSpeed = \frac{max - min}{\frac{period}{2}} \cdot t + min \quad (8)$$

$$refSpeed = \frac{min - max}{\frac{period}{2}} \cdot t + 2 \cdot max - min \quad (9)$$

En la Figura 25 es pot veure aquesta l'entrada rampa generada amb C#.

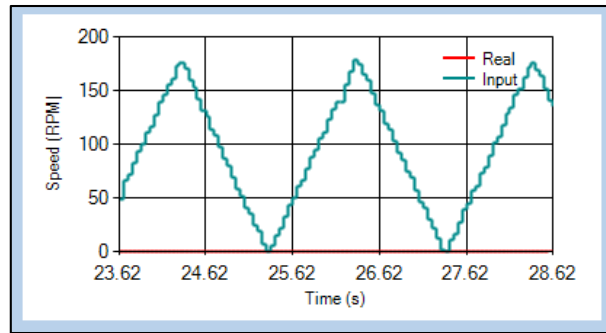


Figura 25. Entrada rampa generada amb C#

### 5.3. Entrada sinusoidal

Finalment, l'entrada sinusoidal es generarà mitjançant la relació matemàtica de l'equació 10.

$$refSpeed = amplitude \cdot \sin(2\pi ft) + amplitude \quad (10)$$

En la Figura 26 es pot veure l'entrada sinusoidal generada amb C#.

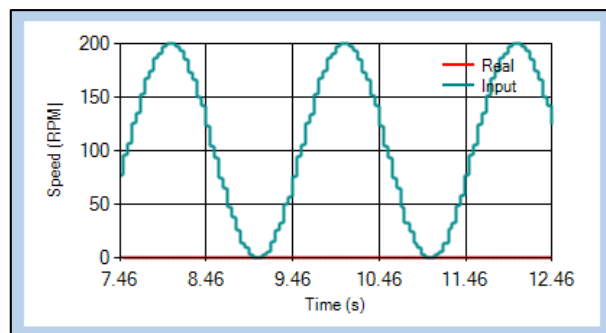


Figura 26. Entrada sinusoidal generada amb C#

## 5.4. Funcionament

En la Figura 27 es pot veure la interfície creada amb C#.

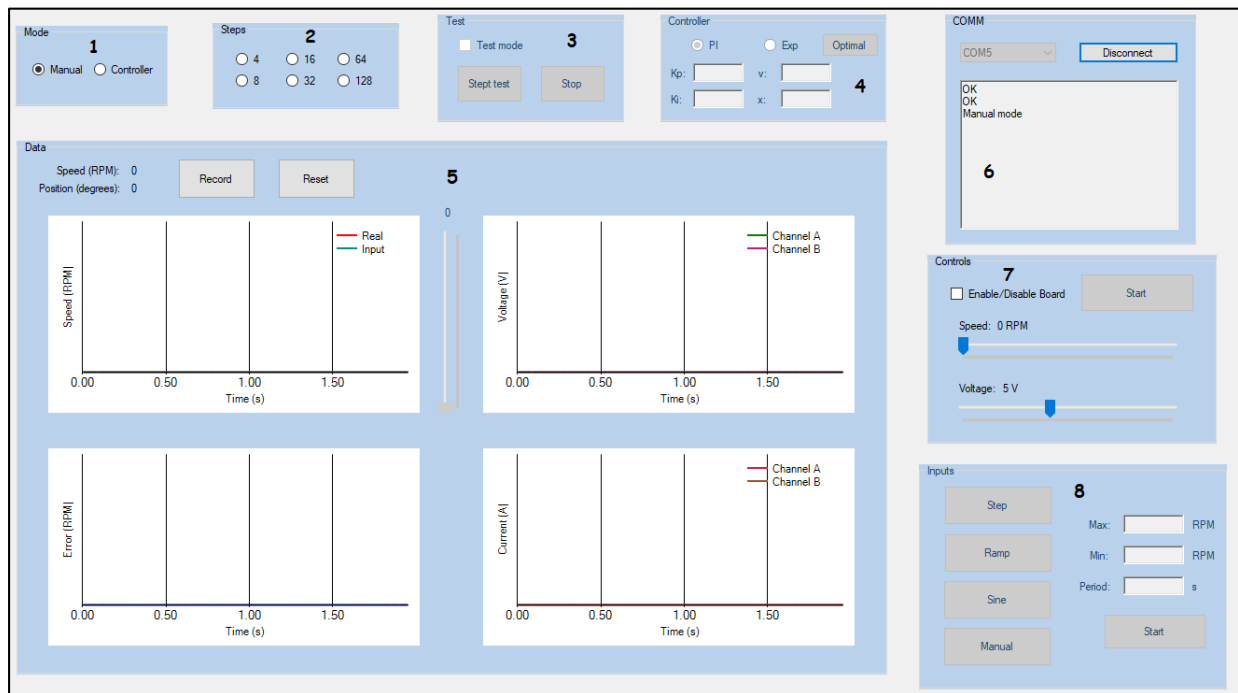


Figura 27. Interfície C#

Els elements de la interfície són:

1. **Selecció de mode:** Es selecciona el mode de funcionament, manual o mitjançant un controlador.
2. **Selecció de passos:** Es selecciona el número de passos desitjat.
3. **Mode test:** Aquest mode permet provar els passos d'un en un per comprovar el correcte funcionament d'aquests.
4. **Paràmetres i selecció controlador:** Es selecciona el tipus de controlador a utilitzar i els seus paràmetres.
5. **Zona de monitorització:** En aquesta part es veuen totes les dades rebudes del motor, juntament amb l'error entre les entrades de referència i la velocitat. També es disposa d'un botó que permet emmagatzemar les dades en un arxiu de text per facilitar el seu anàlisi.
6. **Port sèrie:** Es selecciona el port sèrie amb el que es vol comunicar. En la casella de text, es veuen els diferents missatges rebuts de l'arduino.
7. **Control del motor:** Permet iniciar i aturar el motor i activar i desactivar el driver de motor. En mode manual, es pot modificar la velocitat i el voltatge del motor.
8. **Entrades:** En mode controlador, es selecciona l'entrada a generar i els seus corresponents paràmetres.



## 6. Resultats

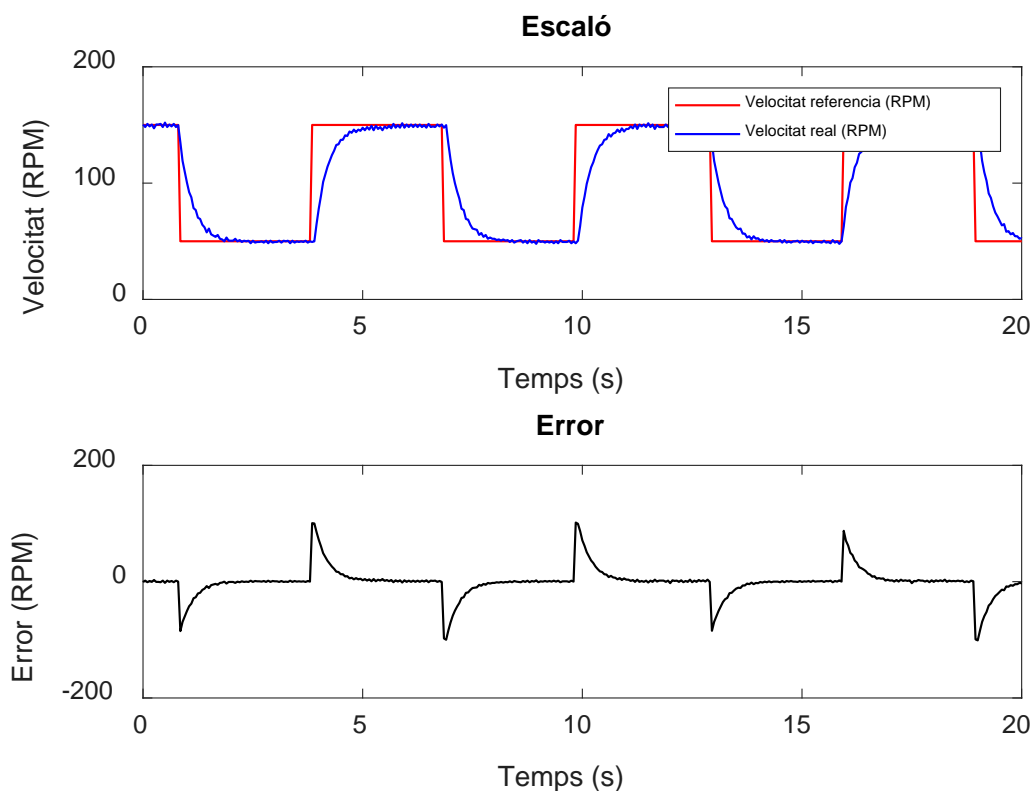
Tots els sistemes de control, ja siguin en llaç obert o en llaç tancat, disposen d'una relació matemàtica entre l'entrada del sistema i la sortida, anomenada funció de transferència.

En el cas del sistema de control disposat en aquest projecte, l'obtenció de la funció de transferència del motor té una complexitat elevada. Tot i això, gràcies a l'anàlisi del comportament del sistema envers a diferents entrades, es pot deduir de quin tipus de sistema es tracta.

Els resultats exposats en aquest apartat seran analitzats posteriorment a l'apartat de conclusions.

### 6.1. Controlador proporcional-integral

En la Figura 28, la Figura 29 i la Figura 30 es pot veure el comportament del sistema i l'error envers a les diferents entrades generades si el controlador proporcional-integral és l'utilitzat.



*Figura 28. Comportament sistema i error entrada escaló amb controlador PI*

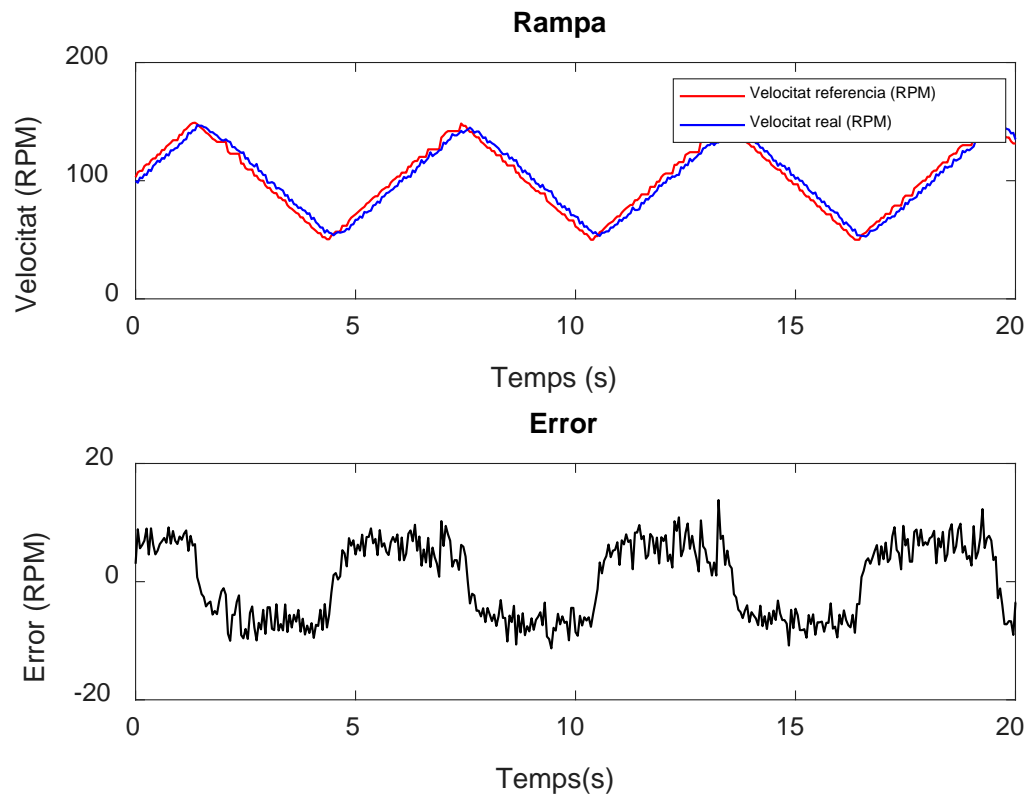


Figura 29. Comportament sistema i error entrada rampa amb controlador PI

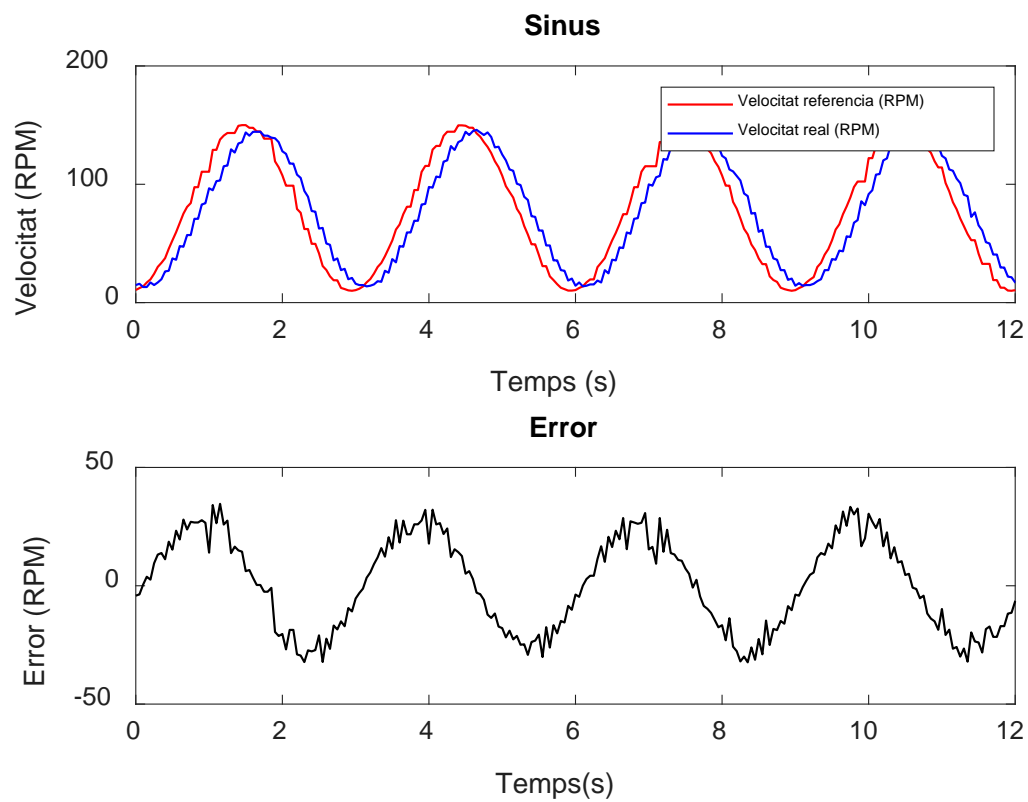


Figura 30. Comportament sistema i error entrada sinusoidal amb controlador PI

## 6.2. Controlador exponencial

En la Figura 31, la Figura 32 i la Figura 33 es pot veure el comportament del sistema i l'error envers a les diferents entrades generades si el controlador exponencial és l'utilitzat.

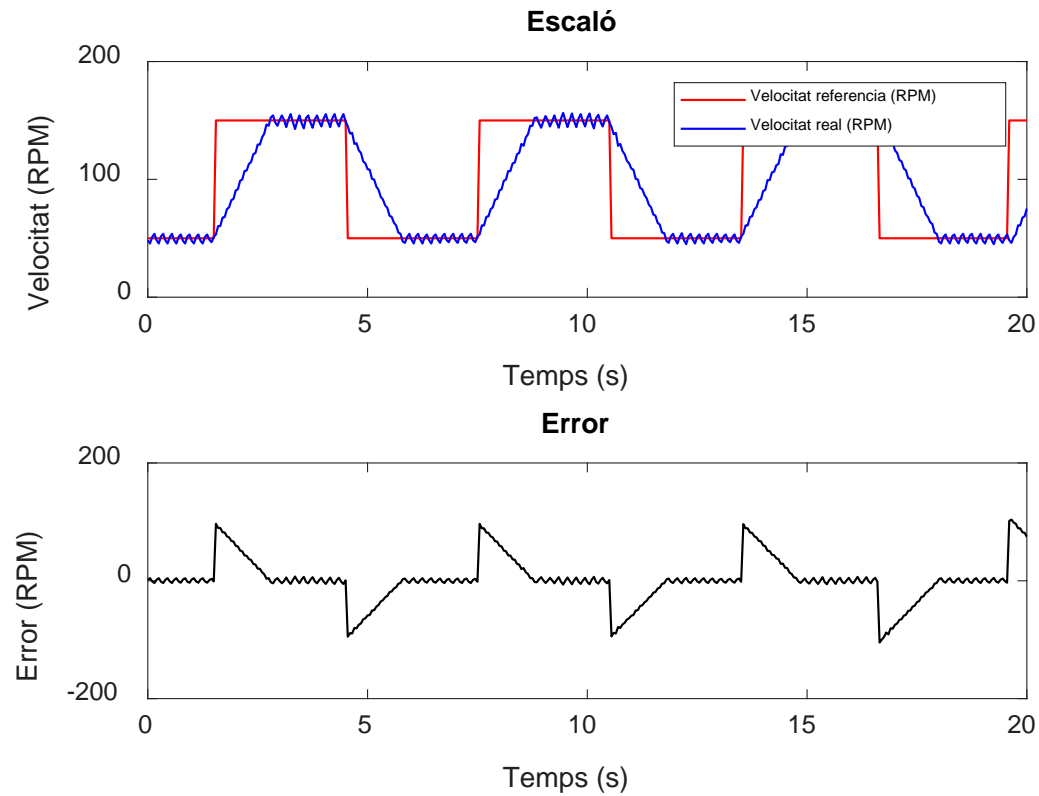


Figura 31. Comportament sistema i error entrada escaló amb controlador exponencial

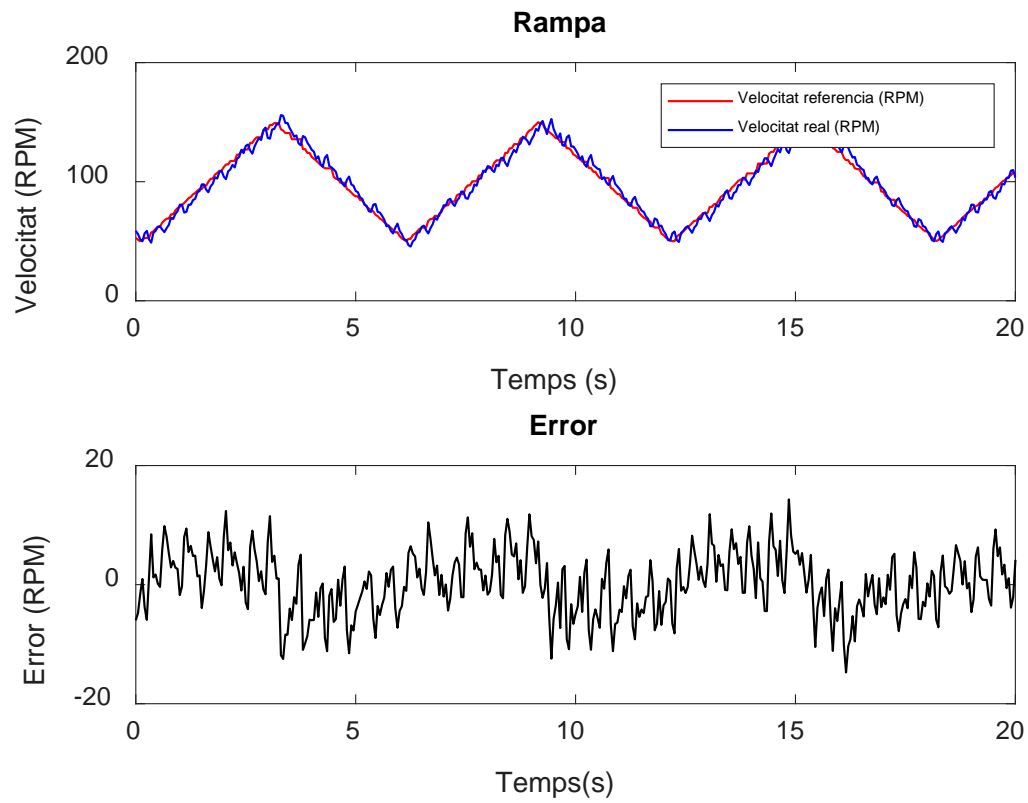


Figura 32. Comportament sistema i error entrada rampa amb controlador exponencial

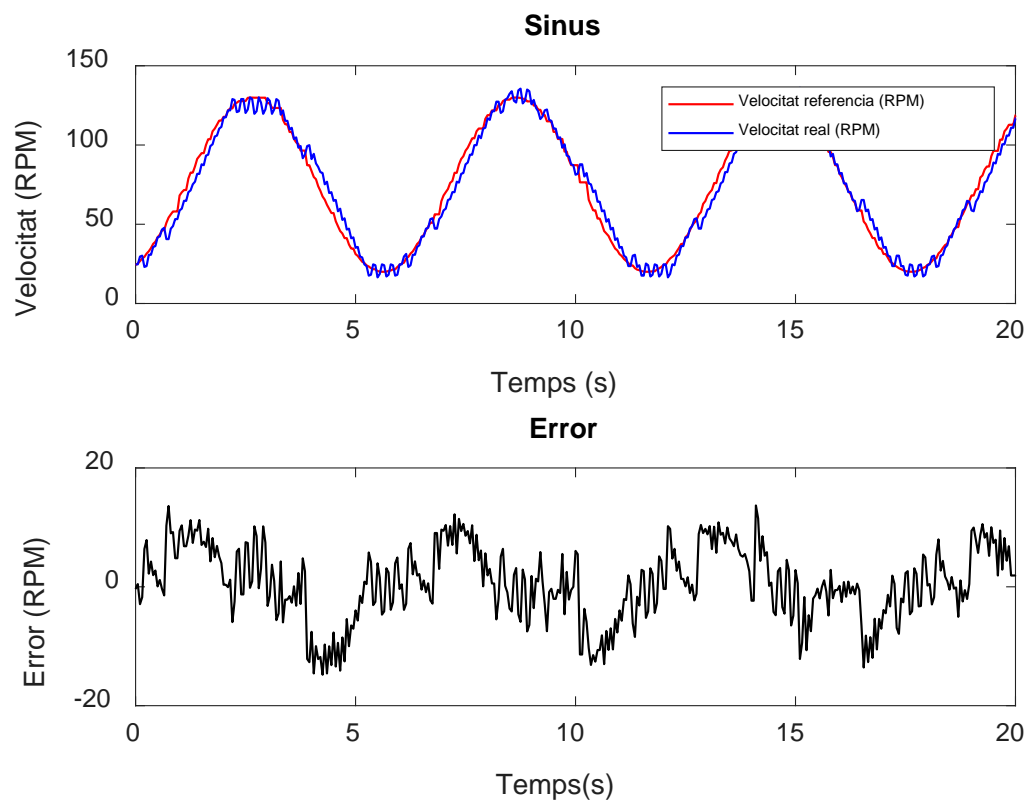
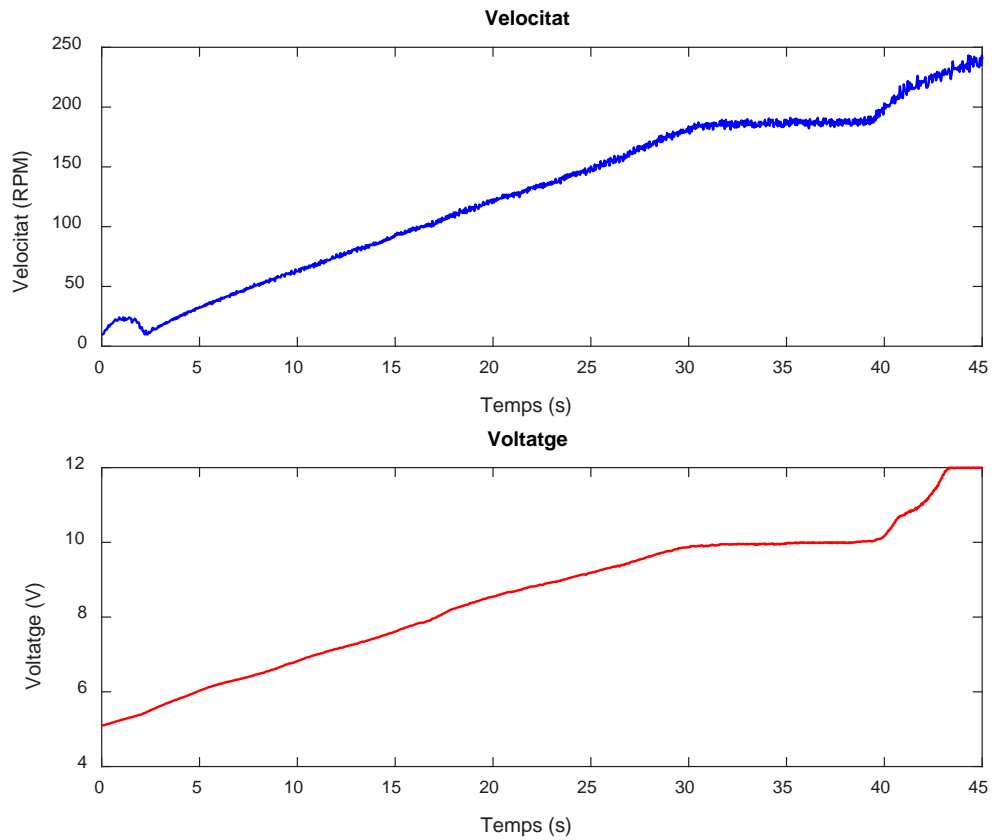


Figura 33. Comportament sistema i error entrada sinusoidal amb controlador exponencial

### 6.3. Controlador voltatge

En la Figura 34, la Figura 35, la Figura 36 i la Figura 37 es pot veure la variació del voltatge respecte a la velocitat desitjada.



*Figura 34. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada manual*

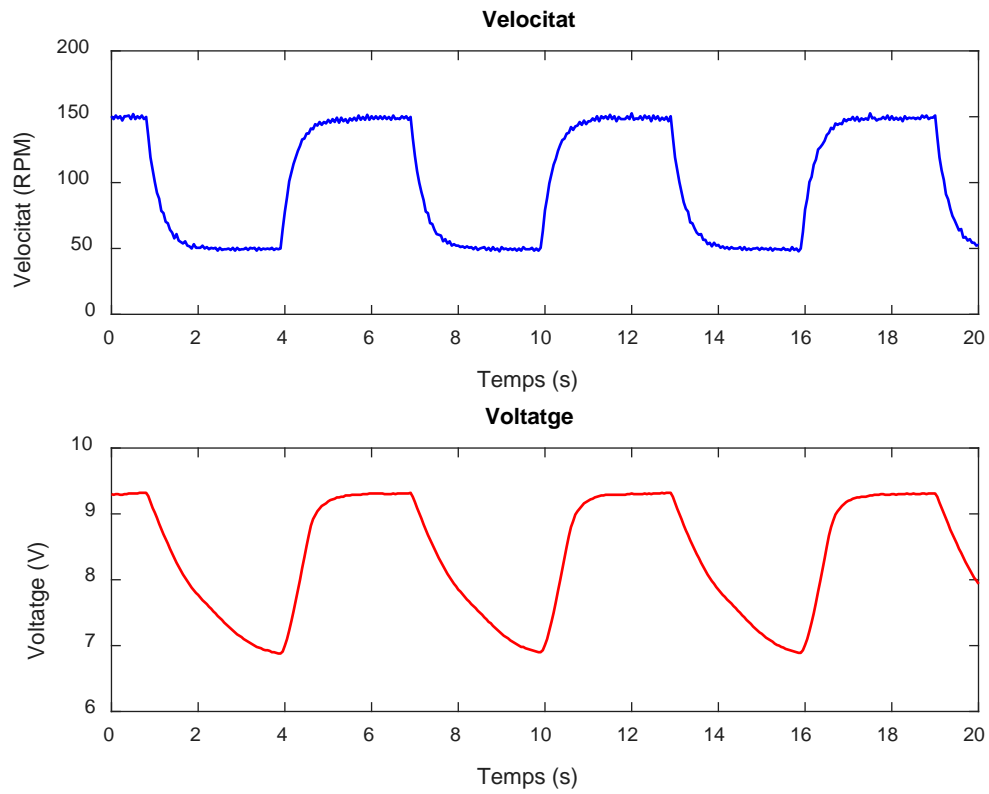


Figura 35. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada escaló

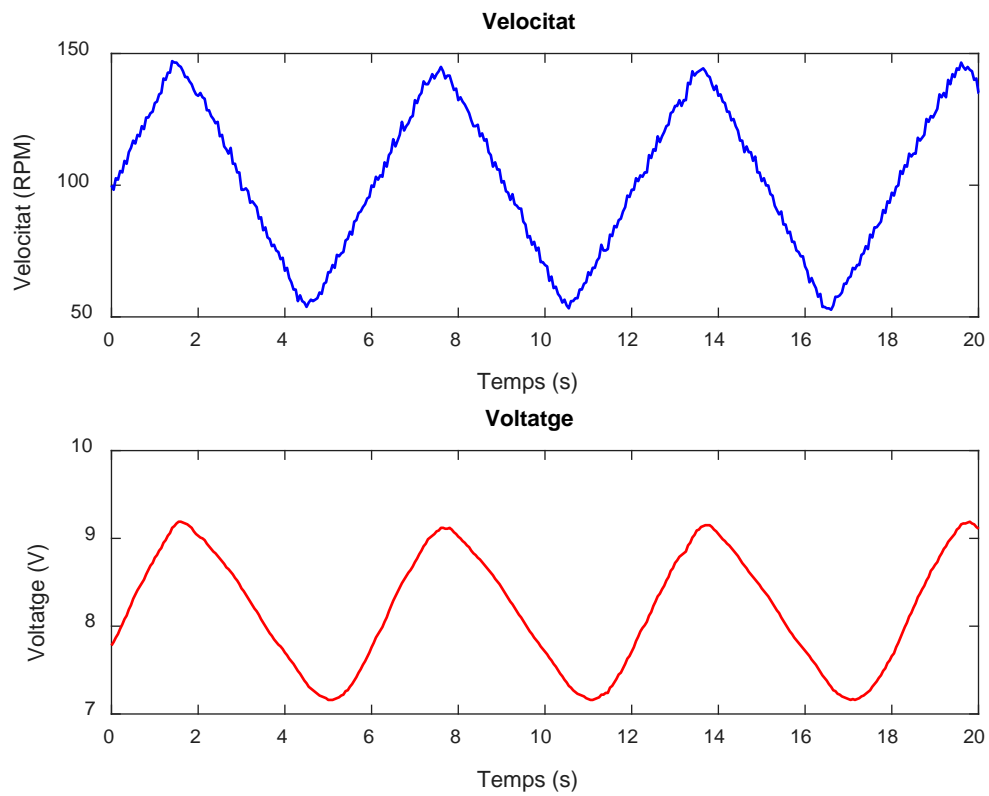
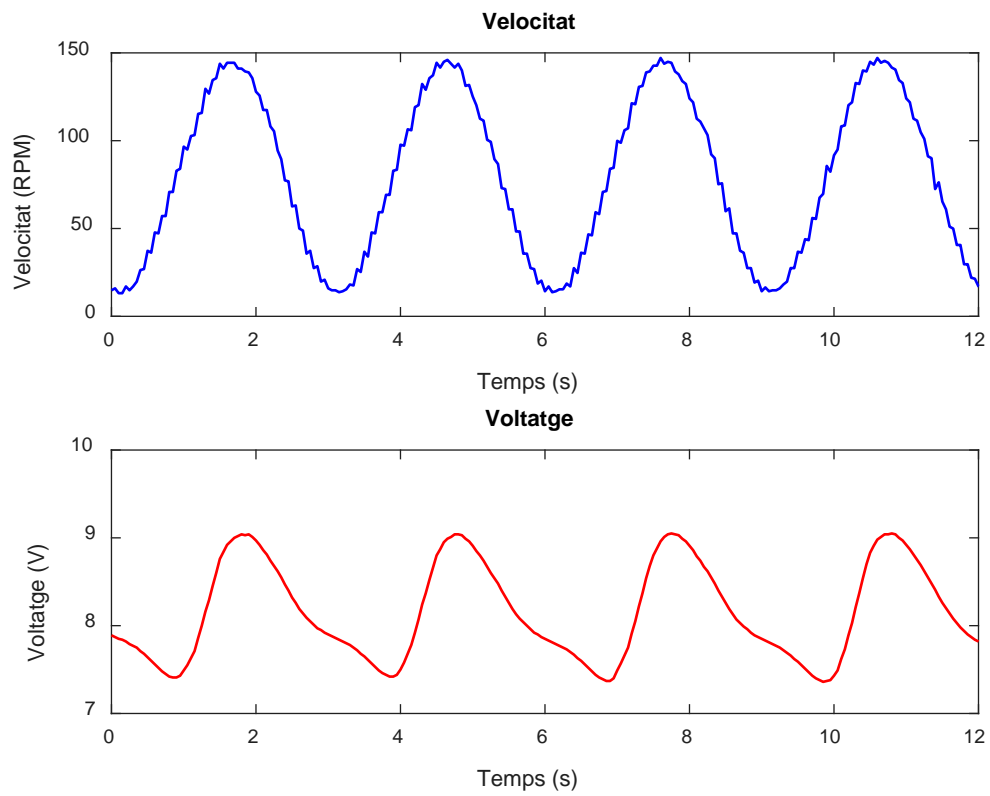


Figura 36. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada rampa



*Figura 37. Voltatge aplicat respecte a la velocitat del motor per entrada sinusoidal*

## 7. Conclusions

### 7.1. Objectius

Un cop finalitzada la realització d'aquest projecte es pot procedir a avaluar l'assoliment dels objectius marcats en l'inici de la seva realització.

- Estudiar el motor pas a pas

El primer dels objectius que es va marcar va ser l'estudi del motor pas a pas per tal de poder aprendre el seu funcionament i els seus tipus. Després de dur a terme una exhaustiva recerca sobre aquest tipus de motors, es pot afirmar que s'ha assolit el primer objectiu.

- Fer un sistema de control en llaç tancat mitjançant un codificador rotatiu (encoder)

El segon objectiu, era el d'aconseguir un sistema de control en llaç tancat mitjançant un encoder que permetés monitoritzar la velocitat a la que s'està movent el motor en tot moment. Aquest objectiu també ha set assolit.

- Minimitzar el consum

El tercer objectiu, va estar fer que el consum del motor sigues el mínim necessari per moure's a una velocitat especificada enlloc d'estar sempre aplicant el màxim voltatge donat per la font d'alimentació utilitzada, és a dir, 12 VDC en el nostre cas.

L'acompliment d'aquest objectiu ha estat possible gràcies a la monitorització de les dades de voltatge i corrent aplicats en cada bobina que ens proporciona el driver de motor.

- Implementar un controlador

El quart i últim objectiu, va ser la implementació d'un controlador mitjançant el qual poder especificar una velocitat desitjada a la que el motor anés.

Finalment, s'han aplicat dos tipus de controladors per tal de veure com es comportava el motor per cadascun d'ells a l'hora de seguir diferents entrades i poder avaluar l'error que presenten envers d'aquestes.



## 7.2. Controlador proporcional-integral i exponencial

Un cop analitzats els resultats dels dos tipus de controladors utilitzats, es procedirà a la seva discussió.

Primerament, s'ha provat com responia el sistema davant d'una entrada escaló. En els dos controladors, l'error en estat estacionari ha estat zero. Això permet afirmar que com a mínim, el sistema serà de tipus 1.

Seguidament, s'ha provat com responia el sistema davant d'una entrada rampa. En aquest cas, es produeix un error constant, sent aquest lleugerament inferior en el controlador proporcional-integral.

Finalment, s'ha provat com responia el sistema davant d'una entrada sinusoïdal. La sortida també presenta un error constant, lleugerament inferior en el controlador exponencial.

Es pot concloure que el sistema és de tipus 1 ja que no té error de posició però sí un error constant de velocitat. A més, es pot afirmar que l'error d'acceleració seria infinit en cas de disposar d'una entrada de tipus exponencial.

## 7.3. Controlador voltatge

El controlador de voltatge aplicat ha complert la seva funció, entregant al motor només el voltatge necessari en cada moment per mantenir la velocitat especificada.

A més a més, quan al motor se li presenta una resistència al moviment, aquest voltatge també augmenta per tal de no reduir la velocitat i mantenir-la constant.

Com a proposta de millora, en cas de disposar d'una font d'alimentació amb un voltatge superior, el motor es podria fer girar a una velocitat més elevada sense tindre pèrdua de passos, sempre dins dels marges de voltatge i corrent establerts en les especificacions tècniques del motor, és a dir, uns valors màxims de 24 V i 1.68 A.

## 8. Referències

- [1] G. Baluta, "Microstepping Mode for Stepper Motor Control," 2007 International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Iasi, 2007, pp. 1-4.
- [2] M. Zribi and J. Chiasson, "Position control of a PM stepper motor by exact linearization," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 36, no. 5, pp. 620-625, May 1991.
- [3] P. Crnosija, B. Kuzmanovic and S. Ajdukovic, "Microcomputer implementation of optimal algorithms for closed-loop control of hybrid stepper motor drives," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 6, pp. 1319-1325, Dec. 2000.
- [4] [http://www.motechmotor.com/products\\_detail.php?id=148&cid=&page=1](http://www.motechmotor.com/products_detail.php?id=148&cid=&page=1)
- [5] <https://store.arduino.cc/arduino-due>
- [6] <https://www.pololu.com/product/2503>
- [7] <https://www.ia.omron.com/product/item/2324/>
- [8] <https://www.sunsky-online.com/view/218820.htm>